

加载速率对砂岩破碎及能耗特征的影响

李少华^{1,2}, 朱万成¹, 牛雷雷¹, 代 风¹
(1. 东北大学 深部金属矿山安全开采教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819; 2. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 为了研究应力波加载速率对岩石破碎与能量利用效率的影响,利用杆件纵向撞击面局部变形的非线性模型设计了5种不同曲率半径的锤头,获得了非等入射能与等入射能条件下不同加载速率的入射应力波,并对红砂岩进行了冲击试验.结果表明:随着应力波加载速率的增大,砂岩试样破碎块度的分形维数呈近似线性增长关系.在加载速率相同的情况下,砂岩试样破碎块度的分形维数随入射能的增大而增大.随着入射应力波加载速率的增加,破碎能耗密度增大.在加载速率相同的情况下,入射能越大岩石破碎能耗密度越大.在非等入射能条件下,岩石破碎过程中的能量利用率随着入射能的增大呈明显的下降趋势.实际生产中最优的应力波形必须综合考虑破岩效果和能量利用率等因素.

关 键 词: 岩石破碎;摆锤冲击;等入射能;能量利用率

中图分类号: TU 45 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2017)10-1459-05

Effect of Loading Rate on Fragmentation and Energy Dissipation Characteristics of Sandstone

LI Shao-hua^{1,2}, ZHU Wan-cheng¹, NIU Lei-lei¹, DAI Feng¹
(1. Key Laboratory of Ministry of Education on Safe Mining of Deep Metal Mines, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: ZHU Wan-cheng, professor, E-mail: zhuwancheng@mail.neu.edu.cn)

Abstract: In order to study the effects of loading rate of stress wave on rock breaking and energy efficiency, 5 hammers with different radius of curvature were designed by using the nonlinear model of the local deformation in the longitudinal impact surface of the members. Incident stress waves with different loading rates were achieved under different and identical incident energy, and the impact test of red sandstones was conducted. The results showed that the fractal dimension of fragmentation of sandstone specimen increases linearly with the increase of the loading rate of stress wave. The fractal dimension of fragmentation of sandstone specimen increases with the increase of incident energy under the same loading rate. The energy dissipation density increases with the increase of loading rate of incident wave. Under the same loading rate, the greater the incident energy is, the greater the energy dissipation density is. The energy efficiency decreases obviously with the increase of the incident energy under different incident energy. In practice, the best incident wave must be designed considering the factors such as rock breaking and the energy efficiency.

Key words: rock breaking; impacted by pendulum hammer; same incident energy; energy efficiency

在岩石工程中,受动力荷载作用的现象比较普遍,例如冲击凿岩和工程爆破等^[1]. 在冲击凿岩中,不同的活塞结构形式冲击会产生不同的加载应力波波形;在爆破时,不同的装药量和装药结构也会产生不同的爆炸应力波波形.研究表明,加载速率对岩石类材料的动态力学性能有显著影

响^[2],因此研究不同加载速率下岩石材料的破碎及能耗规律对于岩石工程具有重要意义.黎立云等^[3]研究了砂岩在不同冲击速度下的破坏能量规律:达到相同破坏程度静态加载比动态加载消耗更多能量.Hong 等^[4]研究了中应变率下岩石破碎过程中的能耗规律:单位能耗密度随着总入射能量的增加呈线性增长关系.Zhang 等^[5]利用 SHPB 实验系统与高速摄像机定量分析了岩石动态破裂过程中的能耗规律:能量利用率随着子弹速度的增大而减小.虽然已有学者针对破岩效率和冲击速度进行研究,但是通过提高速度改善破碎效果的方法在一定程度上降低了能量的利用率,并没有达到真正的高效破碎^[5-6].为了对冲击凿岩和工程爆破中应力波波形的选择提供理论依据,本文分别通过改变锤头的冲击速度与锤头的形状获得具有不同加载速率的入射应力波,研究应力波加载速率对砂岩破碎块度及能耗规律的影响,分析如何更加高效地利用冲击能.

1 入射波形理论分析

1.1 试验装置

本文采用如图 1 所示的撞击面为弧面的摆锤,摆锤在如图 2 所示的摆锤冲击加载 SHPB 试验装置上撞击入射杆产生入射波形^[7].

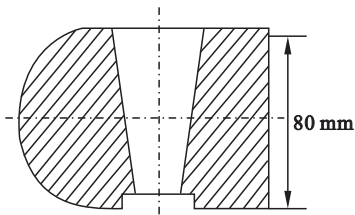


图 1 弧面的摆锤锤头
Fig. 1 Hammer with cambered surface

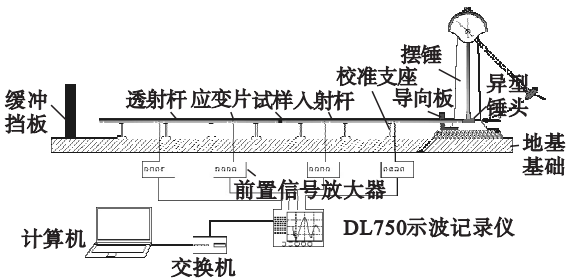


图 2 摆锤冲击加载 SHPB 试验装置
Fig. 2 Pendulum hammer driven SHPB apparatus

1.2 撞击面局部变形的非线性理论模型

邹定祥^[8]运用弹性力学中的赫兹接触应力理论提出了一个撞击面局部变形的非线性理论模型.用一个没有质量的非线性弹簧表示撞击面的

局部变形特征,并将它与一维波动理论的基本方程组成求解锤与杆撞击过程的入射应力波的基本方程,获得了与实测波形非常接近的理论波形,如图 3 所示.其中 v_H 与 v_B 分别表示锤头与杆端面的速度.

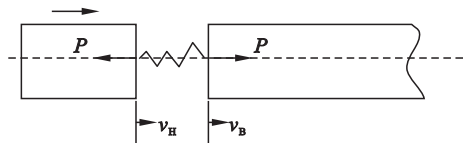


图 3 撞击非线性理论模型
Fig. 3 Nonlinear theory model of impact

撞击过程的力学方程为

$$P^{2/3} = h_1 (s_H - s_B) . \tag{1}$$

式中: s_H, s_B 分别为锤头与入射杆端部的位移; P 为撞击面的压力; h_1 为撞击面的“特征参数”.

$$h_1 = \left(\frac{16}{9\pi^2} \frac{r_1 r_2}{(k_1 + k_2)^2 (r_1 + r_2)} \right)^{1/3} , \tag{2}$$

$$k_1 = \frac{1 - \nu_1^2}{\pi E_1} , k_2 = \frac{1 - \nu_2^2}{\pi E_2} . \tag{3}$$

式中: r_1, r_2 分别为两接触面的曲率半径; ν_1, ν_2 分别为两撞击体材料的泊松比; E_1, E_2 分别为两撞击体材料的弹性模量.由式(2)可知 h_1 与接触面的几何参数有很大关系.

1.3 入射应力波分析

为了分析入射应力波的入射能和加载速率与锤头几何参数和冲击速度的关系,设计了 5 种不同曲率半径的锤头,锤头的质量为 4.8 kg,直径为 80 mm,曲率半径分别为 40, 70, 100, 130 和 160 mm.利用这 5 种不同形状的锤头在图 2 的试验装置上以 4.0 m/s 的速度撞击入射杆,应力波的加载速率与入射能如图 4 所示.

由图 4 可知,在相同冲击速度下,随着锤头曲率半径的增大,应力波加载速率增大,入射能却减小;通过调整锤头的曲率半径和冲击速度可获得入射能相等但加载速率不同的应力波.为了获得不同加载速率的入射应力波,对 5 种锤头进行冲击试验,结果如图 5 所示. $r = 40$ mm 的锤头,在 $v = 4.0$ m/s 时,入射能为 52.28 J,加载速率为 0.82 MPa/ μ s,入射应力波如图 5 中绿色曲线所示.入射能为 52.28 J,加载速率分别为 0.97, 1.1, 1.25 和 1.3 MPa/ μ s 时,增大其他 4 种锤头的冲击速度,获得了等入射能和不同加载速率下的入射应力波,如图 5 中黑色曲线所示.入射能分别为 64.98, 74.86, 83.36 和 86.86 J 时,利用 40 mm 的锤头,调整其冲击速度,获得与黑色曲线相对应加

载速率下非等入射能的应力波,如图 5 中红色曲线所示.

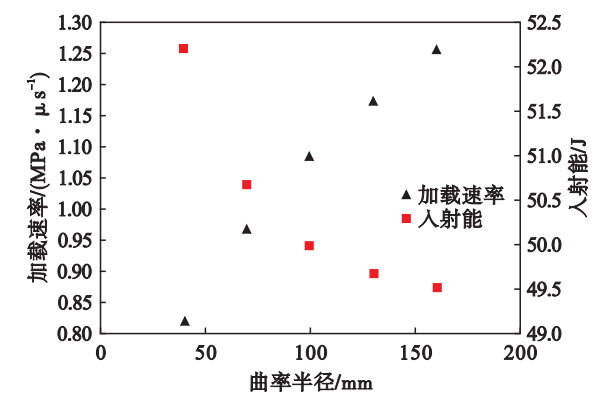


图 4 曲率半径对入射能和加载速率的影响
Fig. 4 Effect of curvature radius on incident energy and loading rate

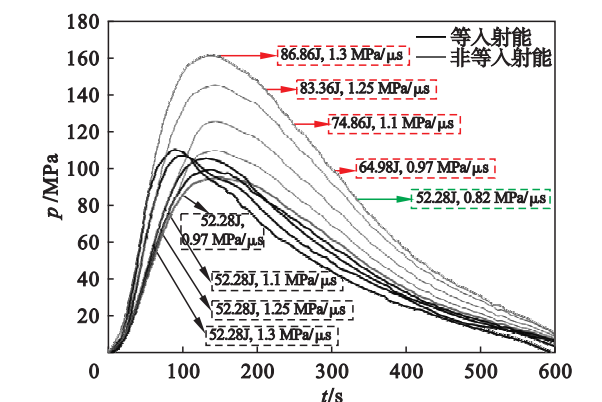


图 5 不同曲率半径锤头产生的入射应力波
Fig. 5 Incident stress wave generated by hammers with different curvature radius

2 动态加载下砂岩试验结果分析

2.1 试样基本物理力学参数

入射杆和透射杆的直径均为 30 mm,所用的岩石试样直径为 25 mm,长度为 14 mm,满足岩石动态强度试验标准^[9].为了减小试验中由于岩石试件引起的离散性,在一大岩块上密集钻取岩芯,加工成试验所需的试样.对试样 2 个端面进行仔细打磨,使其不平行度和不垂直度均小于 0.02 mm.用超声波测速法测试试样,选取表面均匀无明显缺陷且纵波波速相近的试样.岩石力学试验获得岩石的密度为 2 200 kg/m³,弹性模量为 13.55 GPa,泊松比为 0.22,黏聚力为 5.16 MPa,内摩擦角为 39.63°,单轴抗压强度为 42.39 MPa,抗拉强度为 4.11 MPa.

2.2 砂岩的破碎块度分析

1) 砂岩的破坏模式:在不同加载速率下,应力波作用下砂岩试样的破碎情况如图 6 所示.随

着加载速率的增加,岩石的破碎块度呈现出减小的趋势.这主要由于随着加载速率的增加,需要越来越多的裂纹参与扩展,消耗外力功,从而导致岩石破碎程度加剧.在加载速率相同的情况下,入射能越大岩石越破碎,这主要由于岩石破坏存在一个临界入射应力值 σ_{ic} ^[10],高于此应力水平岩石才能破坏,入射能越高,应力波中高于临界应力值 σ_{ic} 的部分所占比例越大,作用的时间也越长,因此其所获得的岩石越破碎.

2) 砂岩的破碎分形特征:许多学者的研究表明,岩石破碎后的块度有分形性质^[11].按质量-频率关系度量可得到岩石冲击破碎块度分布方程:

$$Y = m(x)/m_t = (x/x_m)^{3-D}. \quad (4)$$

式中: x 为岩石块度; $m(x)$ 为尺寸小于 x 的块度累计质量; m_t 为块度总质量; D 为块度分布的分形维数.对式(4)两边取对数得

$$\ln(Y) = \ln[m(x)/m_t] = (3-D)\ln(x/x_m). \quad (5)$$

(3-D)即为 $\ln[m(x)/m_t] \sim \ln(x)$ 坐标中拟合直线的斜率.

为了定量描述砂岩破碎块度,对不同加载速率下的砂岩碎块进行收集和筛分,将砂岩碎块分成 0~1.18, 1.18~2, 2~5, 5~9.5, 9.5~15 mm 等级.本试验将冲击后的砂岩块度按块度-质量关系进行分形计算,根据破碎块度分析结果可求出破碎块度的分形.破碎块度的分形维数与加载速率的关系如图 7 所示,可以看出,加载速率在 0.8~1.4 MPa/μs 之间时,砂岩试样的破碎块度维数介于 1.8~2.8 之间;随着应力波加载速率的增大,砂岩试样破碎块度的分形维数呈现出线性增长关系,这与岩石试样的细观结构及形状尺寸等密切相关,是这些因素的综合反映^[12].利用线性函数进行拟合得出:非等入射能条件下,拟合直线斜率为 1.60,而等入射能条件下斜率为 1.35.在相同的加载速率下,砂岩试样破碎块度的分形维数随着入射能的增大而增大.

2.3 砂岩能量耗散规律

1) 破碎耗散能计算原理:在 SHPB 试验中,应力波携带能量的计算式为^[13]

$$W = \frac{A_c c_e}{E_c} \int_0^t \sigma^2(t) dt = E_c A_c c_e \int_0^t \varepsilon^2(t) dt. \quad (6)$$

式中: E_c 为入射杆和透射杆材料的弹性模量; A_c 为入射杆和透射杆的横截面积; c_e 为一维弹性波波速.

岩石的破碎能耗密度 W_{unit} 的计算式为

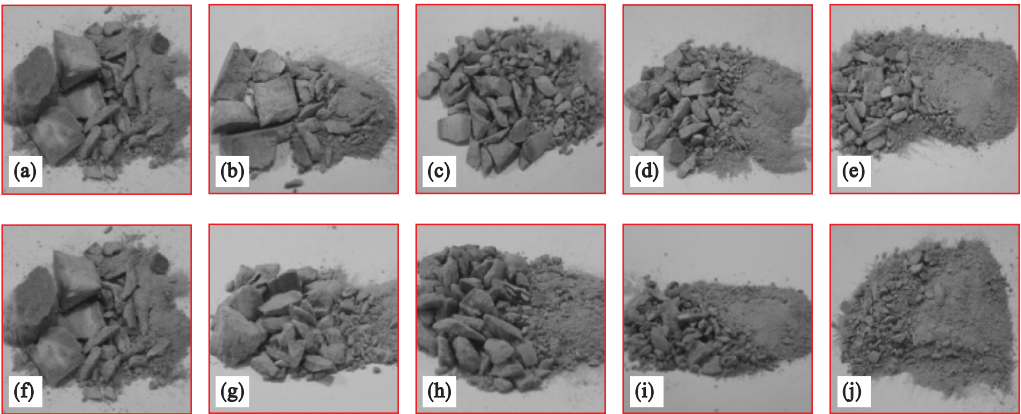


图 6 砂岩试样单轴压缩 SHPB 试验中的破坏模式

Fig. 6 Failure modes of sandstone samples during SHPB tests under dynamic uniaxial compression

(a)—52.28 J,0.82 MPa/μs; (b)—52.28 J,0.97 MPa/μs; (c)—52.28 J,1.1 MPa/μs; (d)—52.28 J,1.25 MPa/μs; (e)—52.28 J,1.3 MPa/μs; (f)—52.28 J,0.82 MPa/μs; (g)—64.98 J,0.97 MPa/μs; (h)—74.86 J,1.1 MPa/μs; (i)—83.36 J,1.25 MPa/μs; (j)—86.86 J,1.3 MPa/μs.

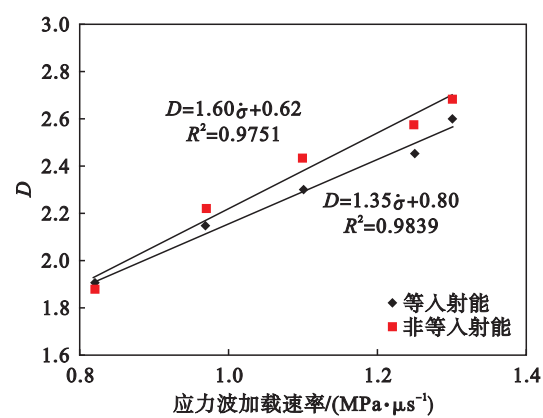


图 7 加载速率对破碎分形维数的影响

Fig. 7 Effect of loading rate on fractal dimension of fragmentation

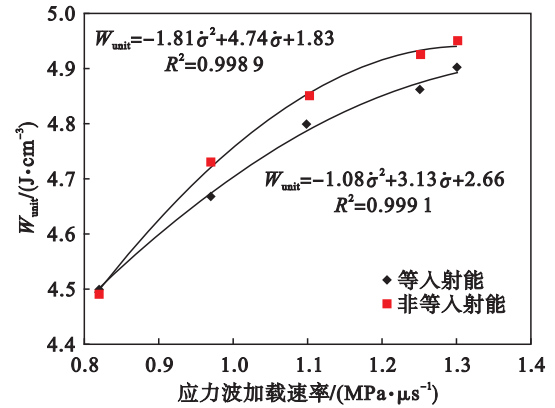


图 8 加载速率对能耗密度的影响

Fig. 8 Effect of loading rate on energy dissipation density

$$W_{\text{unit}} = \frac{W_i - (W_r + W_t)}{V_s} \quad (7)$$

式中: W_i , W_r 和 W_t 分别为入射能、反射能和透射能; V_s 为岩石试样的体积。

能量利用率 ξ 的计算式为

$$\xi = \frac{W_i - (W_r + W_t)}{W_i} \quad (8)$$

2) 砂岩能量耗散规律: 由图 8 可知, 加载速率在 0.8 ~ 1.4 MPa/μs 之间时, 砂岩试样的破碎能耗密度介于 4.5 ~ 5 J/cm³ 之间, 随着加载速率的增加而增大, 而且都呈现二次幂函数增长的趋势。这主要是由于随着加载速率的提高, 岩石内部的微裂纹扩展伴随着更多的穿晶破坏^[14], 从而导致在高加载速率下破坏的岩石需要消耗更多的能量。在加载速率相同的情况下, 入射能越大岩石破碎能耗密度越大。

加载速率对能量利用率的影响如图 9 所示, 可知, 在等入射能条件下, 随着应力波加载速率的增大岩石破碎能耗密度呈现出小范围的增长趋势 (拟合公式为 $\xi = 0.11\sigmȧ + 0.51$, $R^2 = 0.9695$), 但是通过单纯地提高冲击速度所获得的具有较高加

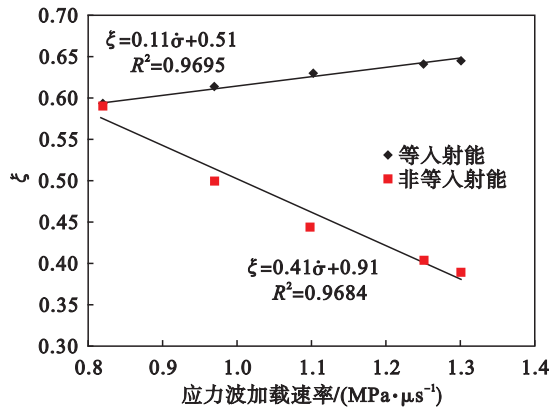


图 9 加载速率对能量利用率的影响

Fig. 9 Effect of loading rate on energy efficiency

载速率的入射应力波破岩时的能量利用率却具有明显的线性下降趋势(拟合公式为 $\xi = -0.41\dot{\sigma} + 0.91, R^2 = 0.9684$). 可知在实际生产中如果单纯以提高冲击速度或增大装药量的方法来达到破碎效果,会造成很大的能量浪费.

3 结 论

- 1) 随着锤头曲率半径的增大,相同冲击速度下所获得的入射应力波加载速率也相应增大,但是所获得的入射能却减小.
- 2) 随应力波加载速率的增大,砂岩试样破碎块度的分形维数呈近似线性增长. 在加载速率相同的情况下,砂岩试样破碎块度的分形维数随着入射能的增大而增大.
- 3) 随入射应力波加载速率的增大,岩石破碎能耗密增大. 在加载速率相同的情况下,入射能越大岩石破碎能耗密度越大. 但是在非等入射能条件下,岩石破碎过程中的能量利用率随着入射能的增大呈明显的线性下降趋势.

参考文献:

[1] Xia K W, Yao W. Dynamic rock tests using split Hopkinson (Kolsky) bar system—a review [J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2015, 7 (1) : 27 – 59.

[2] Zhang Q B, Zhao J. A review of dynamic experimental techniques and mechanical behavior of rock materials [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2014, 47 (4) : 1411 – 1478.

[3] 黎立云,徐志强,谢和平,等. 不同冲击速度下岩石破坏能量规律的试验研究 [J]. *煤炭学报*, 2011 (12) : 2007 – 2011. (Li Li-yun, Xu Zhi-qiang, Xie He-ping, et al. Failure experimental study on energy laws of rock under differential dynamic impact velocities [J]. *Journal of China Coal Society*, 2011 (12) : 2007 – 2011.)

[4] Hong L, Zhou Z L, Yin T B, et al. Energy consumption in rock fragmentation at intermediate strain rate [J]. *Journal of Central South University of Technology*, 2009, 16 (4) : 677 – 682.

[5] Zhang Z X, Kou S Q, Jiang L G, et al. Effects of loading rate on rock fracture characteristics and energy partitioning [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2000, 37 (5) : 745 – 762.

[6] 江红祥,杜长龙,刘送永. 冲击速度对煤岩破碎能量和粒度分布的影响 [J]. *煤炭学报*, 2013, 38 (4) : 604 – 609. (Jiang Hong-xiang, Du Chang-long, Liu Song-yong. The effects of impact velocity on energy and size distribution of rock crushing [J]. *Journal of China Coal Society*, 2013, 38 (4) : 604 – 609.)

[7] Zhu W C, Niu L L, Li S H, et al. Dynamic Brazilian test of rock under intermediate strain rate: pendulum hammer-driven SHPB test and numerical simulation [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2015, 48 (5) : 1867 – 1881.

[8] 邹定祥. 杆件纵向撞击面局部变形的非线性模型 [J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 1980, 1 (1) : 121 – 129. (Zou Ding-xiang. A nonlinear theoretical model of the partial deformation on longitudinally stricken surface bars [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 1980, 1 (1) : 121 – 129.)

[9] Zhou Y X, Xia K, Li X B, et al. Suggested methods for determining the dynamic strength parameters and mode-I fracture toughness of rock materials [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2012, 49 (1) : 105 – 112.

[10] 李夕兵,赖海辉,朱成忠. 冲击载荷下岩石破碎能耗及其力学性质的探讨 [J]. *矿冶工程*, 1988 (1) : 15 – 19. (Li Xi-bing, Lai Hai-hui, Zhu Cheng-zhong. A study of the dynamic properties and energy absorption of rocks [J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 1988 (1) : 15 – 19.)

[11] 谢和平,高峰,周宏伟,等. 岩石断裂和破碎的分形研究 [J]. *防灾减灾工程学报*, 2003, 23 (4) : 1 – 9. (Xie He-ping, Gao Feng, Zhou Hong-wei, et al. Fractal fracture and fragmentation in rocks [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2003, 23 (4) : 1 – 9.)

[12] Xie H P. Fractals in rock mechanics [M]. Rotterdam : A. A. Balkema Publishers, 1993.

[13] Lundberg B. A split Hopkinson bar of energy absorption in dynamic rock fragmentation [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts*, 1976, 13 (6) : 187 – 197.

[14] Zhang Q B, Zhao J. Effect of loading rate on fracture toughness and failure micromechanisms in marble [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2013, 124 (2) : 288 – 309.